



# 基于 LabVIEW 的光学载荷测试用模拟空间 环境监测系统

韩建平<sup>1</sup>, 周文龙<sup>2</sup>, 孙明哲<sup>1</sup>, 李晓坤<sup>2</sup>, 唐 宁<sup>1</sup>, 刘维新<sup>1\*</sup>

(1. 山东大学(威海)空间科学与物理学院, 威海 264209; 2. 山东大学(威海)机电与信息工程学院, 威海 264209)

**摘要:** 空间光学载荷需要在洁净、暗黑、温湿度和压强适宜的实验环境中进行测试, 为使模拟实验条件更接近空间环境尤其是光照环境, 在千级洁净实验室中搭建了一套适合空间光学载荷成像和杂散光测试的多参量传感系统, 可实时监测实验中灰尘粒子数、环境光分布、温湿度和大气压强, 开发了基于 LabVIEW 的控制程序通过串口管理各传感器, 对环境条件数据进行采集、存储和综合分析。测试表明: 该监测系统能够对弱光环境下的尘埃粒子、大气状态进行实时监测和综合分析, 提高了光学载荷自动化测试的监测能力和校准数据的可靠性。

**关键词:** 空间光学载荷; 千级洁净实验室; 环境监测; 尘埃粒子数; LabVIEW

中图分类号: P353.7

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20220508

## Simulation Space Environment Monitoring System for Optical Payload Test Based on LabVIEW

HAN Jianping<sup>1</sup>, ZHOU Wenlong<sup>2</sup>, SUN Mingzhe<sup>1</sup>, LI Xiaokun<sup>2</sup>, TANG Ning<sup>1</sup>, LIU Weixin<sup>1\*</sup>

(1. School of Space Science and Physics, Shandong University, WeiHai 264209, China;

2. School of Mechanical Electrical & Information Engineering, Shandong University, WeiHai 264209, China)

**Abstract:** The space optical payload experiment needs to be carried out in the environment with clean, dark and apposite temperature, humidity and pressure conditions. In order to make the simulated experimental conditions closer to the space environment, especially the light environment, a set of multi-parameter sensing system, which is suitable for space optical payload imaging and stray light testing, is established for the real-time monitoring of data (dust particle count, ambient light distribution, temperature, humidity and air pressure) in the class thousand clean laboratory. Based on the LabVIEW controlling program, the sensors are managed through serial communication, and the environmental condition data are collected, stored and comprehensively analyzed. Tests show that the monitoring system is capable of real-time monitoring and comprehensive analysis for dust particles and atmospheric condition under weak light conditions, and the monitoring capability of test automation of optical load and the reliability of calibration data is improved.

**Key words:** space optical payload; class thousand clean laboratory; environmental monitoring; dust particle count; LabVIEW

近些年来, 随着空间探测技术的不断推进, 人类对外太空的认识越来越深入, 发射了一系列探测器进行科学和应用研究。其中, 利用光学载荷进行遥测是重要的一类, 尤其是针对太阳的成像和光谱探测, 可以预报太阳活动对空间天气的影响情况, 保障生产生活 and 航空航天活动的安全<sup>[1-2]</sup>。除了各可靠性测试外, 光学载荷在地面上

还需要进行一系列与光学观测直接有关的测试和标定实验, 以保证发射后入轨正常运行。

探测载荷的光学测试一般要求模拟太空暗环境, 避免环境光的干扰。为此, 需要消减非测试光之外的其他环境光, 以及对测试光和光路进行特殊设计, 避免通过周围物体的反射或散射再次进入光学载荷形成杂光。基于这样的测试要求,

收稿日期: 2022-08-18; 修回日期: 2023-07-12

基金项目: 山东大学实验室建设与管理研究(sy20203502, sy20202502)。

作者简介: 韩建平(1985-), 女, 硕士, 助理实验师, 主要从事空间探测技术、实验室建设方面的研究。

\* 通信作者: 刘维新(1980-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事空间探测技术方面的研究。E-mail: liuwx@sdu.edu.cn

建设洁净光学暗室完成光机系统装调、光学成像质量、探测器响应检测等工作<sup>[3-4]</sup>。暗室墙壁四面采用哑光黑材料, 减小表面反射光, 并保持千级以上洁净度<sup>[5]</sup>, 降低光路中灰尘散射光, 因为一颗灰尘粒子落在光学材料的表面上就会在载荷成像面上接收到很强的光信号。

在光学载荷的测试过程中, 暗光环境下, 人员的进入会引起额外光的反射和较大颗粒灰尘扬起, 被测试光照射形成散射光。为此, 最好在无人值守的情况下完成载荷的光学测试。为保证实验顺利进行, 需要对实验室内光分布、灰尘情况及洁净度进行实时在线检测。目前, 实验室信息化和自动化管理有多种方案: 有的主要侧重提高实验室人员和设备管理的信息化程度<sup>[5-11]</sup>; 有的针对实验环境或测试设备设计了多通道远程数据采集系统<sup>[12-13]</sup>或虚拟粒子计数系统<sup>[14-15]</sup>。但在暗光环境下同时监测各实验条件参量的还未有报道, 有必要针对这一特殊条件下的环境光强、尘埃粒子数、温度、湿度以及大气压强等多参量同步监测技术进行研究, 以完成空间探测载荷的光学测试。

本文针对在研的探测载荷——空间白光日冕仪, 开展了暗环境实验条件下的监测系统开发。日冕仪是通过遮挡太阳光球光, 对周围微弱的日冕光进行成像观测的仪器, 对于太阳物理研究和空间天气预报非常重要<sup>[16]</sup>。与其他空间光学载荷一样, 日冕仪在地面测试时要在暗环境中对光学

系统成像质量、杂散光以及光度和平场校准进行高灵敏测试实验, 以评估其载荷的光学性能<sup>[17-19]</sup>。本文将给出地面测试环境中的洁净度、暗环境光照、温湿度、压强等监测系统硬件搭建; 开发基于 LabVIEW 的远程数据存储、显示和设备管理程序, 保障在实验过程中及时发现环境参量中的异常变化, 及时调节测试方案, 完成空间光学载荷的测试和校准。

## 1 光学载荷测试实验室环境监测系统搭建

### 1.1 总体设计

为了更接近太空暗环境, 超净间的四周墙壁采用哑光黑彩钢板, 设计为千级洁净度, 如图 1 所示。其中, 小洁净室是放置光源的区域, 大超净间(千级超净间)为模拟太空暗环境的测试光学载荷区域。图 2(a)为大超净间的现场图, 图 2(b)为相对应的实验暗环境现场图; 测试实验室是与外界相连, 用来做常规光学实验的区域。测试光学载荷的洁净区与放置模拟光源的小洁净室通过长光学通道连接在一起, 光源从光源室出发进入测试区域。本系统搭建的各个传感器, 在 A、B、C、D 点处为尘埃粒子计数器, 监测光束附近的尘埃粒子数目; 在 H 点处为温湿度、压强计, 监测环境中的温湿度及压强, 使其保持在一个恒定的范围<sup>[20]</sup>; 在 E、F、G 点处为光功率计, 监测暗环境光(图 1 红色箭头标注处)。

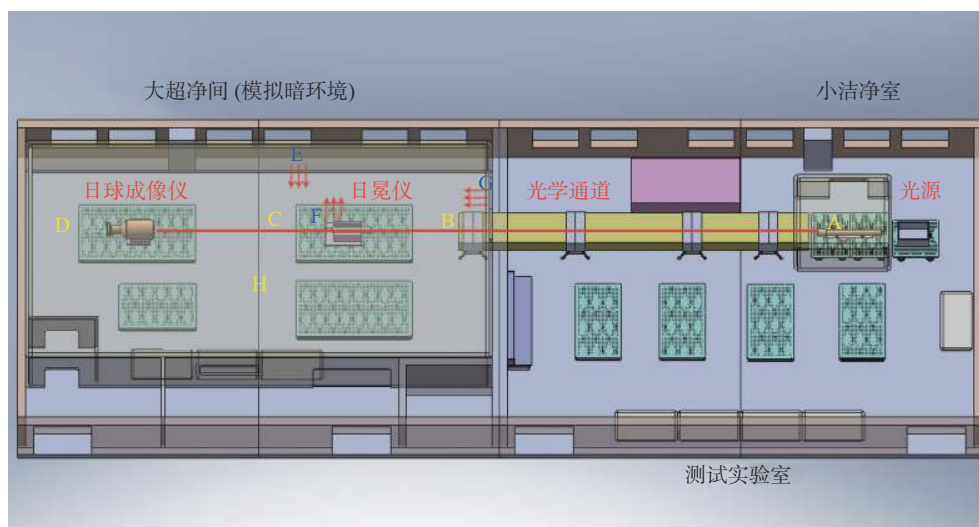


图 1 实验室千级超净间平面图

空间光学载荷实验室暗环境要求温度、湿度及压强需要在一个稳定的条件下, 同时洁净室要

保持千级洁净度的水平。为此, 设计了远程实时监测实验室环境参量的监测系统, 如图 3 所示。

光功率、温湿度、压强传感器通过 NI 数据采集卡 (NI-USB6001) 连接在一起, 通过 USB 接口将采集数据输入监控计算机; 尘埃粒子数据由尘埃粒子计数器进行采集, 通过 RS232 连接到服务器, 使用 Modbus 协议对设备发送指令及接收数据, 实现数据的通信交互。开发 LabVIEW 程序将各个收集出来的数据进行展示, 形成监控界面, 最后通过数据交互的方式进行实验室外的远程监控。



(a) 大超净间的现场图



(b) 实验暗环境现场图

图 2 实验室千级超净间装调测试区及实验室暗环境图片



图 3 总体设计方案

### 1.2 硬件介绍

温湿度传感器: 本系统采用的温湿度传感

器是螺纹式的, 温度范围为 $-45\sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 精度为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 湿度范围为 $0\sim 100\%\text{RH}$ , 精度为 $\pm 2\%\sim \pm 3\%\text{RH}$ ; 供电电源为 DC 24 V; 输出电压为 0.5~4.5 V。

压强传感器: 压强传感器采用的是华控兴业的压强变送器(HSTL-DQY01), 为瑞士进口芯片, 量程范围为 $0\sim 110\text{ kPa}$ , 信号输出电压为 $0\sim 5\text{ V}$ 。

光功率计: 光功率计是 Thorlabs 的光功率计表头 (PM101USB) 以及光电二极管功率探头 (S130), 光的测量范围是 $400\sim 1100\text{ nm}$ 。

NI 数据采集卡: 本系统采用 NI-USB6001 数据采集卡, 其引脚图如图 4 所示, 有 8 路模拟量输入端口 (AI: 14 位, 20 kS/s), 2 路模拟量输出端口 (AO: 5 kS/s), 13 路数字输入输出端口 (DIO), USB-6001 是一种低成本的多功能 DAQ 设备, 使用 USB 接口直接与 PC 机相连, 使用方便且高效。

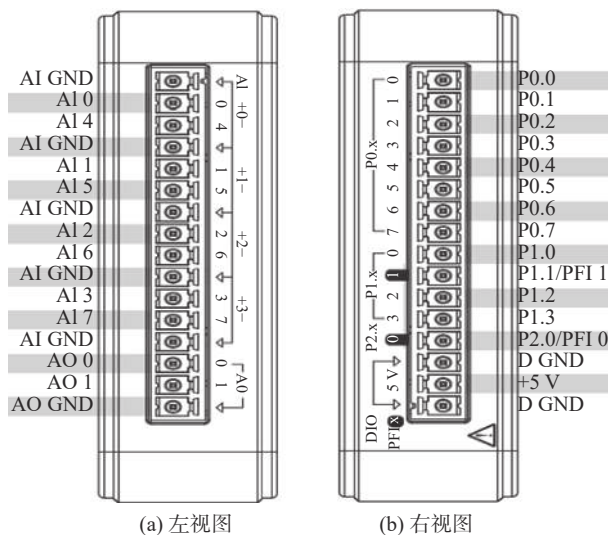


图 4 NI-USB6001 数据采集卡引脚图

尘埃粒子计数器: 尘埃粒子计数器选用的是美国 Lighthouse 的手持式 3016, 该粒子计数器可以采样 6 个通道, 6 个通道的粒子尺寸分别是 $0.3, 0.5, 1.0, 3.0, 5.0, 10.0\text{ }\mu\text{m}$ 。采样流速为 $2.83\text{ L/min}$ , 在一分钟里抽取气体中尘埃粒子数设为 $X$ , 换算为以立方米表示的粒子颗粒数为:

$$Y = 353.3X \quad (1)$$

式中:  $Y$  为粒子颗粒数, 单位 $\text{m}^3/\text{min}$ ;  $X$  为尘埃粒子数。

该设备通过 RS485 或 RS232 与其他设备或软件连接, 使用 Modbus 协议, 实现数据的交互。

每个硬件设备的信号传输方式不同, 通过不同的方式将设备输出的信号接入到计算机上, 实现

信号的输入。温度、湿度、大气压强都是通过传感器将环境中的物理信号转变成电信号, 经由信号调理电路再接入到 NI 数据采集卡上, LabVIEW 程序对采集到的数据进行运算以及处理。尘埃粒子计数器通过 RS232 串口直接与计算机相连, 通过 Modbus 通信协议实现尘埃粒子计数器与计算机的通信, 同时通过 LabVIEW 软件程序设计实现串口数据通信。整体搭建系统如图 5 所示。

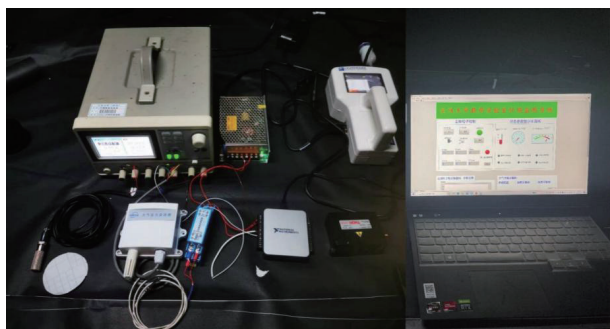


图 5 系统整体搭建现场图

### 1.3 监测程序设计

程序是基于 LabVIEW2021 设计的, 点击登录后进入程序主面板, 如图 6 所示。程序主面板由

尘埃粒子计数器控制面板和状态参数显示面板(温度、湿度、大气压强)两个模块组成。整个程序面板清晰的呈现了对尘埃粒子计数器的打开、关闭及时间的控制, 不同尺寸粒子数的实时数据显示; 温度、湿度、大气压强的实时数据显示。当状态数据超出超净间的状态要求时, 会有报警提示。

本系统采用的尘埃粒子计数器通过 RS232 与计算机相连, 使用 Modbus 协议, 利用 LabVIEW 设计程序, 实现数据的交互。尘埃粒子计数器运行后, 仪器会根据采样时间, 每隔一个采样时间显示一次环境中尘埃粒子的情况。仪器显示尘埃粒子情况是以尘埃粒子的尺寸来衡量的, 该尘埃粒子计数器用了 6 个不同的通道, 显示了 0.3、0.5、1.0、3.0、5.0、10.0  $\mu\text{m}$  共 6 种不同尺寸的尘埃粒子情况。通过程序设计, 可以对尘埃粒子计数器的开关进行控制, 仪器采样时间进行更改, 同时显示 6 个通道尘埃粒子的个数。尘埃粒子监测程序的设计主要包含: 控制程序(仪器打开、采样时间设置、仪器关闭)和显示程序(采样通道显示采样数), 主要设计思路如图 7 所示。



图 6 程序主面板

控制程序以仪器打开为例: 设置串口配置, 通信设置使用 COM 端口<sup>[21]</sup>, 波特率设置 19 200 bit/s, 数据位设置为 8 位, 无奇偶位, 1 位为停止位。首先添加了一个清空数据缓冲区的 VISA 清空控件,

用来清空不需要的缓存数据, 然后按照该尘埃粒子计数器提供的 Modbus 通信协议以及编码规则写入字符串 VISA 中, 写入开始控制的 ASCII 码, 实现仪器打开控制, 程序代码如图 8 所示。

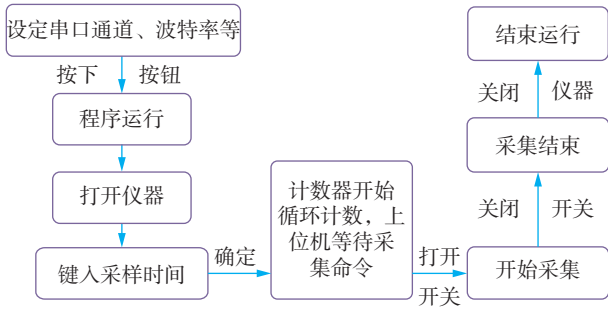


图 7 尘埃粒子控制流程图

显示程序显示不同通道粒子数量，串口配置与控制程序相同，读取字符串 VISA 读取通道的 ASCII 码，经截取字符串函数，分别将不同粒子通道数对应的字符串传送到各自通道，再由字符串转换为数值转换函数，最后显示控件显示出对应

通道的粒子数。

温度、湿度和大气压强 3 参数利用 LabVIEW 中的 DAQmx 进行程序编程设计。设备运行后，从控制面板上可以清晰地看到实验室里这 3 个参数的情况，同时程序还设计了上、下限报警，如果超过了给定的阈值，报警灯则会闪烁，显示程序流程如图 9 所示，程序设计如图 10 所示。首先是数据采集环境的配置：根据实际所用数据采集卡的通道接口，在程序中进行通道设置，本系统选择模拟电压输入；然后进行输入参考单端测量接地系统 RSE(信号接入过程中使用参考对地的电压)的接线端配置。设定采样率(每通道采样周期为 0.2 s)、采样模式(连续采样)、输入最大最小值为±10 V。

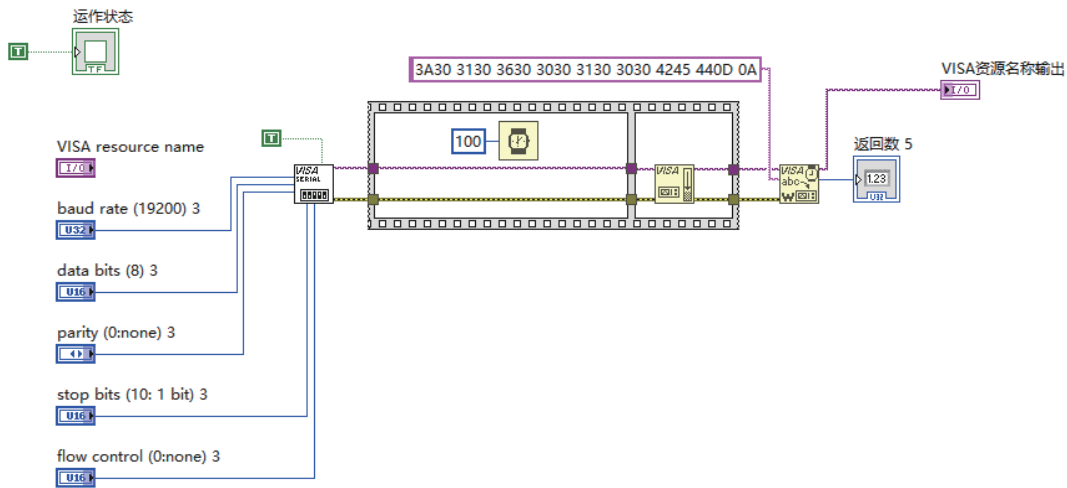


图 8 尘埃粒子计数器打开程序设计

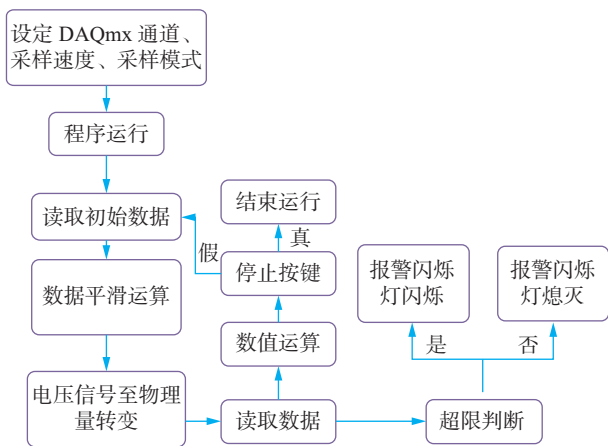


图 9 温度、湿度、大气压强显示程序设计流程图

设置 DAQ 读取模式为模拟多通道单采样，数据类型为 1DDBL(DBL 一维数组)。通过索引数组 VI 将数据采集卡 3 个通道获得的数据(温度、湿度、大气压强)分离开并转换为 DBL 数值。采

样电压值与实际物理值的运算关系如下：

$$T = 5 \times V_{10} \tag{2}$$

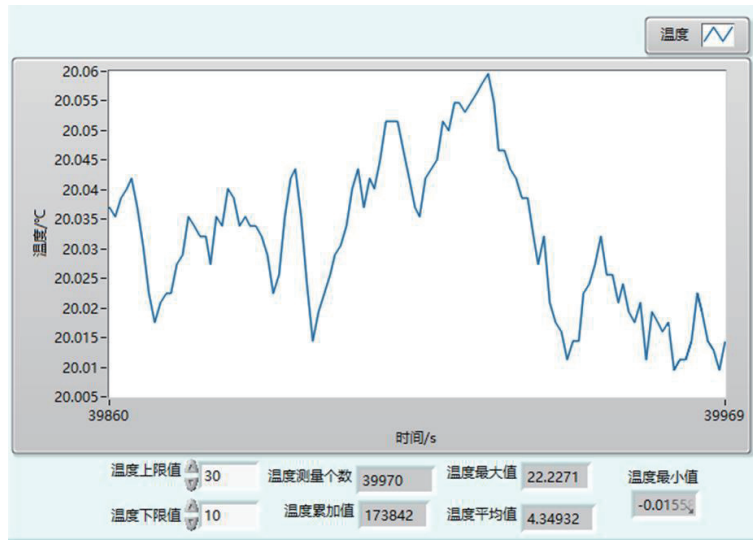
$$H = \frac{V_{11} - 0.5}{4} \tag{3}$$

$$P = 11 \times V_{12} \tag{4}$$

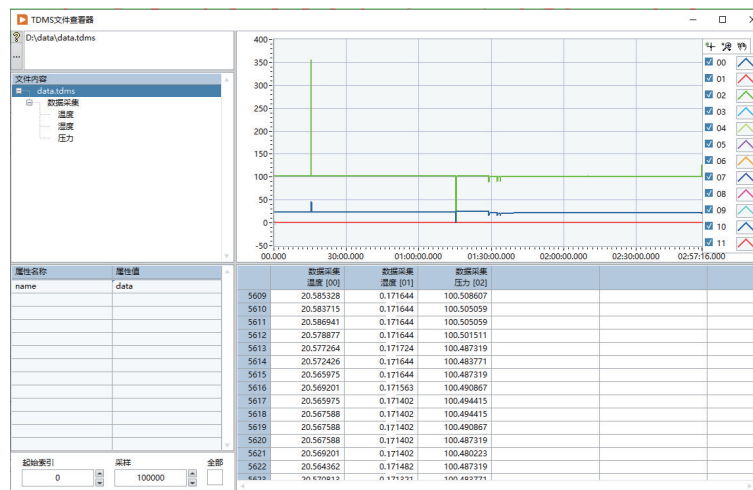
式中： $T$ 为温度，单位  $^{\circ}\text{C}$ ； $V_{10}$ 为温度传感器对应采集的电压，单位  $\text{V}$ ； $H$ 为湿度，单位  $\% \text{RH}$ ； $V_{11}$ 为湿度传感器对应采集的电压，单位  $\text{V}$ ； $P$ 为压强，单位  $\text{kPa}$ ； $V_{12}$ 为压强传感器对应采集的电压，单位  $\text{V}$ 。

将转换后的物理数据与我们规定的上下限值进行数据比较，用布尔指示灯控件的状态来反映数据的超限情况。最后使用层叠式顺序结构、条件结构以及局部变量等，对 3 个物理量(温度、湿度、大气压强)进行数值运算，根据实际需要计算





(a) 数据采集



(b) 存储

图 12 温度、湿度及大气压强采集曲线和文件存储



图 13 监测系统 Web 界面

## 2 实验测试及分析

### 2.1 一天内的状态参数的监测情况

本实验是于超净间内风机和空调机开启后半个小时,环境参数稳定后进行的。对于超净间在一天内的温度、湿度、大气压强及尘埃粒子的监测情况如表1所示。

表1 温湿度监测情况表

时间	温度/°C	湿度/%RH	大气压强/kPa
8: 30	20.32	18.19	101.95
9: 30	20.33	18.18	101.96
10: 30	20.32	18.19	101.97
11: 30	20.33	18.20	101.96
12: 30	20.32	18.22	101.96
13: 30	20.33	18.23	101.95
14: 30	20.32	18.19	101.95
15: 30	20.32	18.20	101.96
16: 30	20.33	18.20	101.97
17: 30	20.32	18.23	101.95

从表中可以看出在风机和空调机打开的情况下,超净间的温度、湿度及大气压强会在恒定的水平上下微小的浮动,符合实验操作环境的标准。

将尘埃粒子计数器放置于实验区域,超净间风机和空调机一直为打开状态,无人进入实验室下,一天的尘埃粒子情况如表2所示(每次采样时间为30s)。

表2 尘埃粒子数监测情况表

时间	尘埃粒子大小/ $\mu\text{m}$					
	0.3	0.5	1.0	3.0	5.0	10.0
8: 30	8	3	0	0	0	0
9: 30	11	2	0	0	0	0
10: 30	8	2	0	0	0	0
11: 30	11	2	0	0	0	0
12: 30	11	3	0	0	0	0
13: 30	13	2	0	0	0	0
14: 30	8	2	0	0	0	0
15: 30	8	2	0	0	0	0
16: 30	11	2	0	0	0	0
17: 30	8	2	0	0	0	0

根据我国超净室的标准(GB 5007—2001)<sup>[5]</sup>,千级超净间的标准下,0.3  $\mu\text{m}$ 的尘埃粒子数不超过102 000个/ $\text{m}^3$ ,0.5  $\mu\text{m}$ 的尘埃粒子数不超过

35 200个。根据表2以及式(1)可以得出0.3  $\mu\text{m}$ 的尘埃粒子数在5 653~7 773个/ $\text{m}^3$ 之间上下浮动,0.5  $\mu\text{m}$ 的尘埃粒子数在1 413~2 112个/ $\text{m}^3$ 之间上下浮动,超净间环境符合千级超净间的标准。

### 2.2 实验室远程监测及现场监测情况下的状态参数情况对比

为了进一步证明本系统搭建对于空间光学载荷实验室的意义,在超净间风机和空调都打开,对实验室内不同位置处(见图1)不同条件下的状态参数进行了测试对比。

远程监控下,超净间不同位置处的尘埃粒子以及温湿度情况如表3所示,从测得的数据可以看出,不同位置处的状态参数变化不大,都符合千级超净间的标准,但是遵循靠近送风口位置处的尘埃粒子数更小的情况。超净间有人的情况下(即非远程情况)测得的位置C和D处粒子数情况如表4所示。位置C和D处远程监控相对现场测试粒子数性能提高情况如表5所示,从表中可以看出,在远程监控下所测粒子数在0.3  $\mu\text{m}$ 时提高至少13%以上,进一步证明了远程监控超净间环境状态的意义。

表3 远程监控下不同位置处状态参数情况

位置	尘埃粒子大小/ $\mu\text{m}$						温度/°C	湿度/%RH
	0.3	0.5	1.0	3.0	5.0	10.0		
A	7	1	0	0	0	0	20.60	20.20
B	8	2	0	0	0	0	19.33	19.90
C	3	1	0	0	0	0	20.64	20.89
D	13	3	0	0	0	0	20.67	20.89

表4 超净间内部有人时不同位置处状态参数情况

位置	尘埃粒子大小/ $\mu\text{m}$						温度/°C	湿度/%RH
	0.3	0.5	1.0	3.0	5.0	10.0		
C	5	1	0	0	0	0	20.80	20.25
D	15	6	0	0	0	0	20.80	20.26

表5 远程监控相比现场测试粒子数性能提高情况

位置	尘埃粒子大小/ $\mu\text{m}$	
	0.3	0.5
C	20%	0%
D	13%	50%

### 2.3 实验室不同位置处暗环境的测量

空间光学载荷测试的实验环境是模拟太空



暗环境,当模拟太阳光入射到暗环境中时,图 1 中位置 E(墙面反射光)、F(环境光)、G(墙面反射光)的环境光强情况分别为:  $0.09 \text{ mW/mm}^2$ 、 $0.9 \text{ mW/mm}^2$ 、 $0.2 \text{ mW/mm}^2$ 。

通过对比可以得出,环境中由于仪器以及其他设备对模拟太阳光的反射,杂散光的光相对较强。由于墙壁做了发黑处理,经墙壁反射回来的暗环境光较小。对不同位置处暗环境光强的测量,得到一个暗环境光分布情况,对空间载荷实验测试提供一个基础保障服务。

### 3 结束语

本文以提高实验室信息化水平和实验效率为出发点,针对在研的探测载荷在地面测试暗环境参数的监测,基于 LabVIEW 程序,搭建了一个适宜空间光学载荷测试的暗环境系统。经使用测试,该监测系统能够对弱光环境下的尘埃粒子、大气状态进行实时监测和综合分析,保障在实验过程中及时发现环境参量中的异常变化,及时调整测试方案,完成空间光学载荷的测试和校准。

### 参考文献

- [1] 杨孟飞,代树武,王颖,等. 太阳空间探测进展与展望[J]. 中国空间科学技术, 2022, 42(5): 1-10.
- [2] 甘为群,黄宇,颜毅华. 太阳空间探测的过去与未来[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2012, 42(12): 1274-1281.
- [3] BONATO E, SCHWINGER S, MATURILLI A, et al. A new facility for the planetary science community: The planetary sample analysis laboratory (SAL) at DLR [C]//84th Annual Meeting of the Meteoritical Society. Chicago, USA: [s. n.]. 2021.
- [4] DENG J, SONG F, LIU Y. Characterization of local regional atmospheric turbulence by parallel laser beams [C]// Eighth Symposium on Novel Photoelectronic Detection Technology and Applications. Kunming: Society of Photo-Optical Instrumentation, 2022.
- [5] 郭党委,冯娟娟. 微纳米加工净化间的环境维护与管理[J]. 实验科学与技术, 2015, 13(1): 176-177.
- [6] 张卫明,王红梅. 高校实验室设备智能化管理模式探析[J]. 实验室研究与探索, 2018, 37(1): 247-251.
- [7] 廉静静,庞玺斌,徐进,等. 高校实验室智能化管理的应用与实践[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(7): 255-257.
- [8] 陈越. 浅谈智能管理系统在高校实验室管理中的应用[J]. 信息记录材料, 2020, 21(9): 77-79.
- [9] 谭光裕,柯虎,刘成,等. 实验室检测仪器设备智能化管理探索与实践[J]. 设备管理与维修, 2020(15): 14-19.
- [10] 王刚刚,顾玲玲,王正. 高校实验室智能化管理系统建设的硬软件开发应用[J]. 木工机床, 2015(3): 19-21.
- [11] 凌晨,毛晨. 环境监测系统中实验室信息管理系统(LIMS)的应用[J]. 中国资源综合利用, 2018, 36(7): 136-138.
- [12] 张秀英. 高校光学超净实验室管理模式探讨[J]. 分析仪器, 2019(5): 71-74.
- [13] 孙春虎,方愿捷. 基于LabVIEW的多通道数据采集系统设计[J]. 滁州学院学报, 2016, 18(5): 75-77.
- [14] 张鹏飞,贾莉娜,王阳,等. 基于LabVIEW的校园环境参数监测系统[J]. 辽宁科技学院学报, 2018, 20(3): 8-9.
- [15] 程学珍,许传诺,徐传文. 基于LabVIEW虚拟粒子计数系统设计[J]. 轻工科技, 2015, 31(10): 76-77.
- [16] 彭庆华. 虚拟仪器软件LabVIEW的串行口通信编程[J]. 自动化仪表, 2002, 23(3): 33-35.
- [17] BYRNE J P, MALONEY S A, MCATEER R T J, et al. Propagation of an earth-directed coronal mass ejection in three dimensions [J/OL]. (2010-09-21). <https://arxiv.org/abs/1010.0643>.
- [18] 袁鸿昌,张红鑫,孙明哲. 内掩式日冕仪衍射杂散光抑制方法[J]. 中国科学技术科学, 2019, 49(11): 1343-1349.
- [19] 袁鸿昌. 内掩式日冕仪杂散光分析与抑制[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2019.
- [20] 刘大洋. 太阳K冕探测关键技术[D]. 山东: 山东大学.
- [21] 丰潇晗. 基于LabVIEW的无人值守实验室远程监控系统 [C]//中国核学会. 中国核科学技术进展报告(第七卷)——中国核学会2021年学术年会论文集第4册(同位素分离分卷). 烟台: 中国核学会2021年学术年会, 2021: 228-233.

编辑 张俊